

⑤1

Int. Cl. 2:

C 25 F 3/00

①9 **BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND**

C 25 F 5/00

C 25 F 7/00

B 23 P 1/04

DEUTSCHES PATENTAMT



DE 29 03 873 A 1

⑪

Offenlegungsschrift 29 03 873

⑫

Aktenzeichen:

P 29 03 873.1

⑬

Anmeldetag:

1. 2. 79

⑭

Offenlegungstag:

30. 8. 79

⑮

Unionspriorität:

⑲ ⑳ ㉑

1. 2. 78 Sowjetunion 2576306 18. 4. 78 Sowjetunion 2605519
26. 6. 78 Sowjetunion 2625801

⑯

Bezeichnung:

Verfahren und Anordnung zur elektrochemischen Bearbeitung

⑰

Anmelder:

Semaschko, Andrej Pavlovitsch; Gimaev, Nasich Zijatdinovitsch;
Maksimov, Ivan Vasilevitsch; Bezrukov, Sergej Viktorovitsch;
Rabinovitsch, Vladimir Borisovitsch; Ufa (Sowjetunion)

⑱

Vertreter:

Füner, A.v., Dr.; Strehl, P., Dipl.-Ing.; Schübel-Hopf, U., Dr.;
Ebbinghaus, D., Dipl.-Ing.; Finck, D., Dr.-Ing.; Pat.-Anwälte,
8000 München

㉑

Erfinder:

gleich Anmelder

Recherchenantrag gem. § 28 a PatG ist gestellt

DE 29 03 873 A 1

PATENTANWÄLTE
SCHIFF v. FÜNER STREHL SCHÜBEL-HOPF EBBINGHAUS FINCK

MARIAHILFPLATZ 2 & 3, MÜNCHEN 90
POSTADRESSE: POSTFACH 95 0160, D-8000 MÜNCHEN 95

2903873

Andrej Pavlovitsch Semaschko
Nasich Zijatdinovitsch Gimaev
Ivan Vasiljevitsch Maksimov
Sergej Viktorovitsch Bezrukov
Vladimir Borisovitsch Rabinovitsch

PROFESSIONAL REPRESENTATIVES ALSO
BEFORE THE EUROPEAN PATENT OFFICE

KARL LUDWIG SCHIFF (1964-1978)
DIPL. CHEM. DR. ALEXANDER v. FÜNER
DIPL. ING. PETER STREHL
DIPL. CHEM. DR. URSULA SCHÜBEL-HOPF
DIPL. ING. DIETER EBBINGHAUS
DR. ING. DIETER FINCK

TELEFON (089) 48 20 54
TELEX 5-23 586 AURO D
TELEGRAMME AUROMARCPAT MÜNCHEN

DEA-19058

1. Februar 1979

VERFAHREN UND ANORDNUNG ZUR ELEKTROCHEMISCHEN BEARBEITUNG

Patentansprüche

1. Verfahren zur elektrochemischen Bearbeitung mit einer mit Impulsen einer an Elektroden angelegten synchronisierten Spannung synchronisierten Zwangsschwingung einer der Elektroden, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , daß der Impuls der Spannung (U) auch zu dem Zeitpunkt geliefert wird, zu dem die Elektroden voneinander in einem minimalen Abstand (S_{\min}) liegen, daß eine durch eine Kavitation im Elektrolyten beim Auseinanderziehen der Elektroden hervorgerufene Änderung eines ein Verhältnis eines zeitlich veränderlichen Wertes des Widerstandes (R) des Zwischenelektrodenraumes (S) zu dessen Wert beim Minimalwert des Zwischenelektrodenraumes (S_{\min}) darstellenden relativen Widerstandes des Zwischenelektrodenraumes (S) überwacht wird, und daß der Wert

909835/0561

des Zwischenelektrodenraumes (S) und ein Druck (P_1) an dessen Eingang unter Konstanthaltung des erforderlichen Änderungswertes des relativen Widerstandes geregelt werden.

2. Verfahren zur elektrochemischen Bearbeitung nach Anspruch 1, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , daß im Bearbeitungsvorgang der erforderliche, durch eine Kavitation im Elektrolyten beim Auseinanderziehen der Elektroden hervorgerufene Änderungswert des relativen Widerstandes des Zwischenelektrodenraumes (S) durch eine periodische Einstellung des erforderlichen Zwischenelektrodenraumes (S) vorgegeben wird, indem der als Vorgabewert geltende und zum Vergleich mit dem laufenden Änderungswert des relativen Widerstandes benutzte Änderungswert des relativen Widerstandes des Zwischenelektrodenraumes jedesmal gemessen und gespeichert wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , daß der durch eine Kavitation im Elektrolyten beim Auseinanderziehen der Elektroden hervorgerufene Änderungswert des relativen Widerstandes des Zwischenelektrodenraumes (S) durch Messung der zweiten Ableitung des relativen Widerstandes nach der Zeit überwacht wird.

4. Verfahren nach Anspruch 1, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , daß der durch eine Kavitation im Elektrolyten beim Auseinanderziehen der Elektroden hervorgerufene

Änderungswert des relativen Widerstandes des Zwischenelektrodenraumes (S) durch Messung des Änderungswertes einer ein Verhältnis eines laufenden Wertes der Spannung zu ihrem Wert beim minimalen Zwischenelektrodenraum (S_{\min}) bei der Speisung von einer Spannungsquelle (1) mit einer fallenden Stromspannungskennlinie darstellenden relativen Elektroden- spannung überwacht wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, d a d u r c h g e - k e n n z e i c h n e t , daß der Änderungswert der relativen Elektroden- spannung durch Messung der zweiten Ableitung der relativen Spannung nach der Zeit überwacht wird.

6. Anordnung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 5, d a d u r c h g e k e n n z e i c h - n e t , daß es einen an die Elektroden angeschlossenen Kavi- tationsgeber (7) enthält, dessen Ausgang elektrisch mit einem Eingang (8) einer Steuereinrichtung (9) für die Bear- beitungsintensität verbunden ist, die eine Auswahl- und Speichereinheit (10) für den Wert eines Kavitationsparame- ters beim minimalen Zwischenelektrodenraum (S_{\min}) ein- schließt, deren Steuereingänge (23, 24) an eine Einheit (28) zur zeitlichen Steuerung und deren Ausgang an einen Eingang (11) einer Recheneinheit (12) für den relativen Wert der Funktion eines Kavitationsparameters angeschlossen sind, wo- bei ihr anderer Eingang (13) und der Eingang der Auswahl- und Speichereinheit (10) für den Wert eines Kavitationspara- meters beim minimalen Zwischenelektrodenraum (S_{\min}) elek-

trisch mit dem Ausgang des Kavitationsgebers (7) verbunden sind, während der Ausgang der Recheneinheit (12) für den relativen Wert der Funktion eines Kavitationsparameters an den Eingang einer Auswahl- und Speichereinheit (16) für den relativen Wert der Funktion eines Kavitationsparameters und an einen Eingang (17) einer Vergleichseinheit (18) für den laufenden relativen Wert der Funktion eines Kavitationsparameters und für einen Vorgabewert angeschlossen ist, deren anderer Eingang (19) mit dem Ausgang der Auswahl- und Speichereinheit (16) für den relativen Wert der Funktion eines Kavitationsparameters verbunden ist, deren Steuereingänge (25, 26) an eine Einheit (28) zur zeitlichen Steuerung angeschlossen sind, während der Ausgang der Vergleichseinheit (18) an eine Sperrschaltung (21) gekoppelt ist, deren Ausgang als Ausgang der Steuereinrichtung (9) für die Bearbeitungsintensität auftritt und an einen Stellmechanismus (22) angeschlossen ist, während der Steuereingang (27) der Sperrschaltung (21) an die Einheit (28) zur zeitlichen Steuerung angeschlossen ist.

7. System nach Anspruch 6, d a d u r c h g e k e n n - z e i c h n e t , daß die Steuereinrichtung (9) für die Bearbeitungsintensität eine Differenziereinheit (51) zweiter Ordnung enthält, deren Eingang an den Kavitationsgeber (7) und deren Ausgang an den anderen Eingang (13) der Recheneinheit (12) für den relativen Wert der Funktion eines Kavitationsparameters angeschlossen sind.

8. System nach Anspruch 6 bis 7, d a d u r c h g e -
k e n n z e i c h n e t , daß der Kavitationsgeber (7) in
Form eines Spannungsgebers ausgeführt ist.

9. System nach Anspruch 6 bis 7, d a d u r c h g e -
k e n n z e i c h n e t , daß der Kavitationsgeber (7) in
Form eines Spannungsgebers (63) und eines Stromgebers (65)
ausgeführt ist, deren Ausgänge an eine Recheneinheit (61)
für den Widerstand des Zwischenelektrodenraumes (S) ange-
schlossen sind, deren Ausgang den Ausgang des Kavitations-
gebers (7) bildet.

B e s c h r e i b u n g

Die vorliegende Erfindung betrifft das Gebiet der elektrochemischen maßhaltigen Präzisionsbearbeitung von Metallen und Legierungen und bezieht sich insbesondere auf ein Verfahren zur elektrochemischen Bearbeitung und auf ein System für dessen Realisierung.

Die vorliegende Erfindung kann zur Ausführung verschiedener Kopier-Räumoperationen in Werkstücken aus schwer zu bearbeitenden Werkstoffen ausgewertet werden.

Es sind Verfahren zur elektrochemischen Bearbeitung von Metallen mit einer Zwangsschwingung einer der Elektroden bekannt. Bei der Verwirklichung dieser Verfahren wird ein synchronisierter Spannungsimpuls ausgenutzt, der auf die Elektroden im Vorgang ihrer Annäherung gegeben wird. Im Augenblick der maximalen Annäherung der Elektroden bleibt

im Schwingungsvorgang der einen von ihnen ein Spannungs-impuls an den Elektroden aus. Die Einstellung der Spannungszuführung im Bereich der maximalen Annäherung der Elektroden setzt aber wesentlich die Leistungsfähigkeit der Bearbeitung und die Kopiergenauigkeit herab.

Es ist ein Verfahren zur elektrochemischen Bearbeitung mit einer mit Spannungsimpulsen synchronisierten Zwangsschwingung einer der Elektroden bekannt, bei dem das Impuls-Pause-Verhältnis im Bearbeitungsvorgang geregelt wird. Die Bearbeitung beginnt bei geringen Werten, und gegen Ende der Bearbeitung wird das Impuls-Pause-Verhältnis vergrößert. Hierbei wird die Impulsfolge zeitlich verschoben, indem die Momentanwerte des Zwischenelektrodenraumes verringert werden, bei denen ein Strom fließt. Nach dem bekannten Verfahren können die Spannungsimpulse sowohl bei der Annäherung der Elektroden als auch bei deren Auseinanderziehen gegeben werden, während im Augenblick der maximalen Annäherung der Elektroden ein Spannungsimpuls ausbleibt. Eine Änderung der Bearbeitungsintensität durch Regelung des Impuls-Pause-Verhältnisses und der zeitlichen Verschiebung der Impulse führt zur Senkung der Genauigkeit der Formbildung, insbesondere beim Räumen von Flächen mit vertikalen Wänden.

Die Besonderheit der bekannten Verfahren der elektrochemischen Bearbeitung ist die, daß die Spannungsimpulse auf die Elektroden bei einem großen Änderungsbereich des stirnseitigen Zwischenelektrodenraumes eingespeist werden.

Dies ist gleichbedeutend mit der Einspeisung eines Spannungsimpulses bei einem großen mittleren stirnseitigen Zwischenelektrodenraum, weshalb die Kopiergenauigkeit der Werkzeugelektrode auf der zu bearbeitenden Fläche wesentlich reduziert wird.

Es ist auch ein Regelungsverfahren für den Elektrodenzwischenraum bei der elektrochemischen Bearbeitung mit einer mit an die Elektroden angelegten Spannungsimpulsen synchronisierten Zwangsschwingung einer der Elektroden (s. einen Urheberschein N. 187125, Internat.Kl.²G 05d 3/00) bekannt. Bei der Realisierung des betreffenden Verfahrens wird den Elektroden ein zusätzlicher Niederspannungsstrom zugeführt, und die Regelung des Zwischenelektrodenraumes erfolgt nach den durch einen Kurzschluß der Elektroden bewirkten Stößen dieses Stroms.

Die Regelung des Zwischenelektrodenraumes nach den infolge einer metallischen Kontaktierung der Werkzeugelektrode mit einem Arbeitsstück entstehenden Stromstößen einer Niederspannungsquelle eliminiert die Möglichkeit einer Impulsgabe der Arbeitsspannung auf die Elektroden im Augenblick deren maximaler Annäherung aneinander, d.h. bei einem Minimalwert des Zwischenelektrodenraumes zwecks Vermeidung einer eventuellen Störung der Werkzeugelektrode und der zu bearbeitenden Fläche infolge der Entstehung eines Kurzschlusses zwischen ihnen. Die Spannungsimpulse werden daher im bekannten Verfahren bei einem Vorschub oder Abhub der Werkzeugelektrode zu

bzw. von der zu bearbeitenden Fläche, d.h. bei einem veränderlichen Wert des Zwischenelektrodenraumes, eingespeist. Mit Rücksicht darauf, daß in den meisten Fällen die Schwingungsamplitude ca. 0,2 mm und das Impuls-Pause-Verhältnis der Arbeitsspannung 2 bis 3 betragen, erfolgt der Prozeß der elektrochemischen Auflösung bei einem großen mittleren Zwischenelektrodenraum, was eine Senkung der Bearbeitungsgenauigkeit zur Folge hat. Dies ist für die Seitenfläche eines zu bearbeitenden Hohlraumes besonders kennzeichnend. Die Erhöhung der Bearbeitungsgenauigkeit durch Vergrößerung des Impuls-Pause-Verhältnisses auf 5 bis 10 (durch Verringerung der Impulsdauer der Arbeitsspannung) zieht eine beträchtliche Vorschubgeschwindigkeitsabnahme nach sich. Darüber hinaus führt die Kontaktierung der Elektroden unter Spannung von einer zusätzlichen Spannungsquelle zu einer Oberflächenerosion der Werkzeugelektrode und des Werkstücks. Bei der Kontaktierung der Elektroden ist auch eine mechanische Verformung der Oberflächen der Werkzeugelektrode und des Werkstücks, insbesondere bei der Bearbeitung von Hohlräumen geringer Abmessungen bei Werkstücken mit geringfügiger Steife, möglich.

Die bekannten Verfahren zur elektrochemischen Bearbeitung und Regelung des Zwischenelektrodenraumes unter den Bedingungen der Anwendung einer mit Spannungsimpulsen synchronisierten schwingenden Bewegung der Elektrode gewährleisten also keine Erzielung einer hohen Bearbeitungsgenauigkeit,-

-leistung und -güte bei der Formbildung komplizierter Formflächen.

Es sind Einrichtungen zur elektrochemischen Bearbeitung bekannt, die von den Grundsätzen einer Analyse von bei verschiedenen Störungen des Prozesses entstehenden und mit einer eventuellen Entwicklung eines Kurzschlusses im Zwischenelektrodenraum zusammenhängenden Stromoberwellen Gebrauch machen.

Diese Einrichtungen dürfen aber nicht zur Realisierung der Verfahren zur elektrochemischen Bearbeitung unter Benutzung eines Impulsstroms herangezogen werden, weil das Hochfrequenzspektrum der Impulsfolge die durch Mikrodurchschläge im Zwischenelektrodenraum verursachten Nutzsignale der Hochfrequenzschwingungen unterdrückt.

Es sind auch Einrichtungen zur elektrochemischen Bearbeitung mit einer schwingenden Elektrode und einem Impulsstrom bekannt, die nach dem Prinzip eines Reglers arbeiten: bei Fehlen gegenseitiger Berührungen der Elektroden verwirklicht die Einrichtung einen automatischen Vorschub einer der Elektroden, bei Berührungen hört der Vorschub auf. Die wirksame Impulsspannung kann nur beim Vorschub oder Abhub der Elektroden, d.h. bei einem variablen Wert des Zwischenelektrodenraumes in dessen großem Änderungsbereich zugeführt werden, was die Kopiergenauigkeit und die Bearbeitungsleistung erheblich herabsetzt.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur elektrochemischen Bearbeitung mit einer

Zwangsschwingung einer der Elektroden synchron mit der Zuführung von Spannungsimpulsen an diese Elektroden und eine Anordnung zu dessen Durchführung zu schaffen, die die Aufrechterhaltung eines minimalen Zwischenelektrodenraumes unter den Bedingungen der Impulsgabe auch zu dem Zeitpunkt ermöglichen, zu dem die Werkzeugelektrode und das Werkstück voneinander in einem minimalen Abstand liegen.

Diese Aufgabe wird dadurch gelöst, daß bei dem Verfahren zur elektrochemischen Bearbeitung mit einer Zwangsschwingung einer der Elektroden synchron mit an die Elektroden zugeführten Spannungsimpulsen der Bearbeitungsprozeß gemäß der Erfindung durch Überwachung einer durch eine Kavitation beim Auseinanderziehen der Elektroden hervorgerufenen Änderung eines ein Verhältnis eines in der Zeit laufenden Wertes des Widerstandes des Zwischenelektrodenraumes zu dessen Wert beim minimalen Zwischenelektrodenraum unter den Bedingungen der Impulsgabe auch zu dem Zeitpunkt des Aufenthalts der Elektroden in einem minimalen Abstand voneinander darstellenden relativen Widerstandes des Zwischenelektrodenraumes geführt wird. Hierbei werden der Wert des Zwischenelektrodenraumes und der Druck des Elektrolyten am Eingang des Zwischenelektrodenraumes geregelt, indem der vorgegebene Änderungswert des relativen Widerstandes konstant gehalten wird.

Der durch Kavitation beim Auseinanderziehen der Elektroden hervorgerufene Änderungswert des relativen

Widerstandes wird durch periodische Einstellung eines erforderlichen Zwischenelektrodenraumes vorgegeben. Hierbei wird die Änderung dieses Widerstandes jedesmal gemessen und gespeichert. Der Speicherwert wird zwischen den Messungen zum Vergleich mit einem laufenden Änderungswert des relativen Widerstandes ausgenutzt.

Zur Genauigkeitserhöhung der Überwachung des durch eine Kavitation beim Auseinanderziehen der Elektroden verursachten Änderungswertes des relativen Widerstandes wird seine zweite Ableitung nach der Zeit gemessen.

Im Falle der Ausnutzung einer im fallenden Ast der Stromspannungskennlinie arbeitenden Speisequelle wird der durch eine Kavitation beim Auseinanderziehen der Elektroden hervorgerufene Änderungswert des relativen Widerstandes zur einfachen und zuverlässigen Prozeßsteuerung durch Messung des Änderungswertes einer ein Verhältnis eines laufenden Wertes der Spannung zu ihrem Wert beim minimalen Zwischenelektrodenraum darstellenden Elektrodenspannung überwacht.

Darüber hinaus wird der Änderungswert der relativen Elektrodenspannung zur Erhöhung der Empfindlichkeit und zur Erweiterung des Regelbereiches nach verschiedenen Formen des Spannungsimpulses durch Messung ihrer zweiten Ableitung überwacht.

Die gestellte Aufgabe wird auch dadurch gelöst, daß in einem System zur elektrochemischen Bearbeitung gemäß der

Erfindung an die Elektroden ein Kavitationsgeber angeschlossen ist, dessen Ausgang elektrisch mit dem Eingang einer Steuereinrichtung für die Bearbeitungsintensität verbunden ist. Die Steuereinrichtung für die Bearbeitungsintensität schließt eine Auswahl- und Speichereinheit für den Wert eines Kavitationsparameters beim minimalen Zwischenelektrodenraum ein, deren Ausgang an einen Eingang einer Recheneinheit für den relativen Wert der Funktion eines Kavitationsparameters angeschlossen ist. Deren anderer Eingang und der Eingang der Auswahl- und Speichereinheit für den Wert eines Kavitationsparameters beim minimalen Zwischenelektrodenraum sind elektrisch mit dem Ausgang des Kavitationsgebers verbunden. Der Ausgang der Recheneinheit für den relativen Wert der Funktion eines Kavitationsparameters ist an den Eingang einer Auswahl- und Speichereinheit für den relativen Wert der Funktion eines Kavitationsparameters und an einen Eingang einer Vergleichseinheit für den laufenden relativen Wert der Funktion eines Kavitationsparameters und für einen Vorgabewert angekoppelt, deren anderer Eingang mit dem Ausgang der Auswahl- und Speichereinheit für den relativen Wert der Funktion eines Kavitationsparameters verbunden ist. Der Ausgang der Vergleichseinheit ist an eine Sperrschaltung angeschlossen, deren Ausgang den Ausgang der Steuereinrichtung für die Bearbeitungsintensität bildet und an einen Stellmechanismus gekoppelt ist. Die Steuereingänge der Auswahl- und Speichereinheit für den Wert eines Kavitationsparameters

909835/0561

BAD ORIGINAL

beim minimalen Zwischenelektrodenraum und der Auswahl- und Speichereinheit für den relativen Wert der Funktion eines Kavitationsparameters und der Steuereingang der Sperrschaltung sind an eine Einheit zur zeitlichen Steuerung ange-koppelt.

Zweckmäßig enthält die Steuereinrichtung für die Bearbeitungsintensität eine Differenziereinheit zweiter Ordnung, deren Eingang an den Kavitationsgeber und deren Ausgang an den anderen Eingang der Recheneinheit für den relativen Wert der Funktion eines Kavitationsparameters angeschlossen sind.

Der Kavitationsgeber kann in Form eines Spannungsgebers ausgeführt sein.

Der Kavitationsgeber kann in Form eines Spannungs- und eines Stromgebers ausgeführt sein, deren Ausgänge an eine Recheneinheit für den Widerstand des Zwischenelektrodenraumes angeschlossen sind, deren Ausgang als Ausgang des Kavitationsgebers fungiert.

Das vorliegende Verfahren zur elektrochemischen Bearbeitung und das System für dessen Verwirklichung gestatten es, verschiedene Kopier-Räumoperationen in Werkstücken aus schwer zu bearbeitenden Werkstoffen mit einer hohen Bearbeitungsgenauigkeit, -leistung und -qualität sowohl bei der Fertigung von komplizierten Formflächen als auch bei der Verarbeitung eines großen Loses von Werkstücken mit gleichen Maßen auszuführen.

Anhand der in der Zeichnung dargestellten Ausführungsbeispiele wird die Erfindung näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 ein Schaltbild einer Anordnung zur Durchführung des Verfahrens zur elektrochemischen Bearbeitung,

Fig. 2 in einem Diagramm die Abhängigkeit der Prozeßparameter bei schwingender Bewegung des Werkzeugs bezüglich der Oberfläche eines Werkstücks,

Fig. 3 ein Zeitdiagramm einer durch eine Kavitation bei einem Abhub des Werkzeuges von der Oberfläche eines Werkstücks verursachten Änderung der relativen Parameter in Abhängigkeit vom Wert eines minimalen Zwischenelektrodenraumes,

Fig. 4 ein Blockschaltbild einer Anordnung zur elektrochemischen Bearbeitung,

Fig. 5 ein Funktionsschaltbild einer Anordnung zur elektrochemischen Bearbeitung,

Fig. 6 eine Anordnung zur elektrochemischen Bearbeitung, das eine Differenziereinheit zweiter Ordnung enthält,

Fig. 7 eine Ausführungsform eines Kavitationsgebers,

Fig. 8 eine zweite Ausführungsform eines Kavitationsgebers,

Fig. 9 ein Zeitdiagramm einer Änderung eines relativen Wertes der Elektrodenspannung und deren zweiter Ableitung bei einem großen Wert des minimalen Zwischenelektrodenraumes,

Fig. 10 ein Zeitdiagramm einer Änderung einer relativen Elektrodenspannung und deren zweiter Ableitung bei einem geringen Wert des minimalen Zwischenelektrodenraumes,

Fig. 11 ein Zeitdiagramm einer Änderung eines relativen Widerstandes des Zwischenelektrodenraumes und seiner zweiten Ableitung bei einem großen Wert des minimalen Zwischenelektrodenraumes,

Fig. 12 ein Zeitdiagramm einer Änderung eines relativen Widerstandes des Zwischenelektrodenraumes und seiner zweiten Ableitung bei einem geringen Wert des minimalen Zwischenelektrodenraumes,

Fig. 13 ein Diagramm, das die Arbeit einer Auswahl- und Speichereinheit für den Wert eines Kavitationsparameters bei einem minimalen Zwischenelektrodenraum erläutert, und

Fig. 14 ein Diagramm, das die Arbeit einer Auswahl- und Speichereinheit für den relativen Wert der Funktion eines Kavitationsparameters erläutert.

Das Verfahren besteht in folgendem. Von einer Speisequelle 1 (Fig. 1) werden auf eine als Werkzeug 2 wirkende Elektrode und auf eine ein Werkstück 3 darstellende Elektrode Impulse der Spannung U gegeben. Die Impulsfrequenz der Spannung U und die Schwingungsfrequenz des Werkzeuges 2 in den durch Pfeile angedeuteten Richtungen sind mit-

einander derart synchronisiert, daß der Spannungsimpuls U zu dem Zeitpunkt geliefert wird, in dem das Werkzeug 2 und das Werkstück 3 in einem minimalen Abstand voneinander liegen, d.h., wenn sich das Werkzeug 2 in der unteren Stellung befindet.

Bei einer elektrochemischen Bearbeitung in einem fließenden Elektrolyten mit einem Druck P_1 am Eingang des Zwischenelektrodenraumes S nähert sich das Werkzeug 2 dem Werkstück 3 mit einer hohen Geschwindigkeit einer mit Hilfe eines Motors 4 erzeugten schwingenden Bewegung. Das Werkstück 3 ist auf einem sich in Richtung auf das Werkzeug 2 mit einer Geschwindigkeit v zu bewegendem Tisch 5 aufgestellt. Infolge der schnellen Annäherung des Werkzeuges 2 an das Werkstück 3 beginnt der hydrodynamische Druck P_S (Fig. 2) des Elektrolyten im Zwischenelektrodenraum S anzusteigen. Die im Elektrolyten enthaltenen und sich in einem elektrochemischen Prozeß entwickelnden Dampf- und Gasbläschen 6 werden zusammengepreßt und im Elektrolyten aufgelöst. Dies hat zur Folge, daß der Vorgang einer anodischen Auflösung der Oberfläche des Werkstücks 3 (Fig. 1) unter diesen Bedingungen bei einer erheblichen Verringerung der Wahrscheinlichkeit eines Durchschlages des Zwischenelektrodenraumes S infolge eines Fehlens der Dampf- und Gasbläschen 6 (Fig. 2) abläuft. Dies gestattet es, die Bearbeitungsgenauigkeit, -leistung und -qualität durch Ermöglichung der Arbeit bei äußerst geringen Zwischenelektrodenräumen S wesentlich zu erhöhen.

Bei einem schnellen Abhub des Werkzeuges 2 (Fig. 1) vom Werkstück 3 - fällt der Druck P_S (Fig. 2) sprunghaft ab. Es beginnt eine intensive Zunahme der im Elektrolyten aufgelösten Dampf- und Gasbläschen 6 im Zwischenelektrodenraum S, d.h. es kommt zu einer durch den Abfall des Drucks P_S des Elektrolyten im Zwischenelektrodenraum S bedingten Kavitation. Dies bewirkt einen steilen Anstieg des Widerstandes R - Abschnitt A des Zwischenelektrodenraumes S. Im Maße der weiteren Vergrößerung des Zwischenelektrodenraumes S wird dessen Spülung mit einem frischen Elektrolyten verstärkt, was mit der Zeit zur Abnahme des Widerstandes R - Abschnitt B des Zwischenelektrodenraumes S - führt. Auf solche Weise liegt beim Abhub des Werkzeuges 2 (Fig. 1) von der Oberfläche des Werkstücks 3 zuerst eine Erhöhung des Widerstandes R (Fig. 2) - Abschnitt A, und dann eine Abnahme - Abschnitt B des Zwischenelektrodenraumes S-vor, d.h. es gibt ein lokales Extremum der Änderung des Widerstandes R.

Bei der elektrochemischen Bearbeitung hängt die Intensität der Ausbildung der durch Kavitation beim Abhub des Werkzeuges 2 (Fig. 1) hervorgerufenen Dampf- und Gasbläschen 6 vom Wert des minimalen Zwischenelektrodenraumes S_{\min} (Fig. 2) und vom Durchfluß des Elektrolyten durch diesen ab. Dies ist darauf zurückzuführen, daß je kleiner der Wert des minimalen Zwischenelektrodenraumes $S_4 < S_1$ (Fig. 3a) ist, desto geringer ist der Durchfluß des Elektrolyten durch diesen und desto schneller reichert sich also der Elektrolyt im Zwischenelektro-

denraum S_4 durch die Dampf- und Gaskomponente an. Der Abhub des Werkzeuges 2 (Fig. 1) von der Oberfläche des Werkstücks 3 wird daher von einem lavinenartigen Anwachsen der Dampf- und Gasbläschen 6 (Fig. 2) im Zwischenelektrodenraum S_4 (Fig. 3a) begleitet. Dies bewirkt eine beträchtliche Erhöhung des Widerstandes R (Fig. 3b) - Abschnitt A_4 des Zwischenelektrodenraumes S_4 .

Wird die elektrochemische Bearbeitung bei großen minimalen Zwischenelektrodenräumen S_1 (Fig. 3a) geführt, so laufen die elektrochemischen Prozesse weniger intensiv ab, und die Anreicherung des Elektrolyten im Zwischenelektrodenraum S_1 durch die Dampf- und Gaskomponente ist geringer. Deshalb ist die Ausbildung der Dampf- und Gasbläschen 6 (Fig. 2) bei diesen Bedingungen unter Einwirken des Abhubes des Werkzeuges 2 (Fig. 1) auch geringfügig. Hierbei wird die auf die Kavitation zurückzuführende Änderung des Widerstandes R (Fig. 3a) - Abschnitt A_1 - auch geringfügig sein, d.h. $A_1 < A_4$.

Die Intensität der beim Abhub des Werkzeuges 2 (Fig. 2) von der Oberfläche des Werkstücks 3 entstehenden Kavitation ist also vom Wert des Zwischenelektrodenraumes S und vom Durchfluß des Elektrolyten durch diesen abhängig.

Die eindeutige Abhängigkeit des Intensitätsgrades der Kavitation vom Wert des minimalen Zwischenelektroden S_{\min} bei einem bestimmten Eintrittsdruck P_1 (Fig. 1.) wird zur

Steuerung des Bearbeitungsvorganges ausgenutzt.

Da die Entwicklung der Kavitation bei einem schwingenden Abhub des Werkzeuges 2 von einer sprunghaften Zunahme des Widerstandes R (Fig. 2) des Zwischenelektrodenraumes S begleitet wird, wird zur Steuerung des Bearbeitungsvorganges der durch Kavitation im Elektrolyten hervorgerufene Änderungswert des relativen Widerstandes des Zwischenelektrodenraumes S überwacht.

Als relativer Widerstand des Zwischenelektrodenraumes S wird das Verhältnis des laufenden Wertes des Widerstandes des Zwischenelektrodenraumes S zu dessen Wert bei minimalem Zwischenelektrodenraum S_{\min} angesehen. Bei der Steuerung nach einem relativen Parameter wird der Einfluß der Änderung der zu bearbeitenden Fläche, der Temperatur des Elektrolyten, seiner Leitfähigkeit usw. ausgeschlossen.

Vor Beginn der Bearbeitung werden die Werkzeugelektrode 2 und das Werkstück 3, die in Bezug aufeinander schwingen, bei fehlender Spannung bis zur gegenseitigen Berührung daran angenähert und um einen Vorgabewert des minimalen Zwischenelektrodenraumes S_{\min} (Fig. 2) auseinandergezogen. Dann werden den Elektroden eine wirksame Impulsspannung U (Fig. 1) zu- und in den Zwischenelektrodenraum S ein Elektrolyt unter einem Druck P_1 eingeführt, und es beginnt der Bearbeitungsvorgang.

Da der Wert des eingestellten minimalen Zwischenelektrodenraumes S_{\min} (Fig. 1) mit dem Intensitätsgrad der Kavita-

tion und als Folge dessen mit dem Änderungswert des relativen Widerstandes des Zwischenelektrodenraumes eindeutig zusammenhängt, wird der Maximalwert der durch Kavitation verursachten Änderung des relativen Widerstandes des Zwischenelektrodenraumes S (Fig. 1) gespeichert.

Weiter wird dieser Wert als ein Wert ausgenutzt, der die im wesentlichen durch den Wert des eingestellten Zwischenelektrodenraumes S bestimmte Bearbeitungsintensität in Querrichtung vorgibt.

Bei einer Abweichung des laufenden durch eine Kavitation hervorgerufenen Änderungswertes des relativen Widerstandes des Zwischenelektrodenraumes S vom Vorgabewert werden die Vorschubgeschwindigkeit v (Fig. 1) und der Druckwert P_S geändert, wobei, wenn der laufende Wert des relativen Widerstandes den Vorgabewert übersteigt, der Druck P_S vergrößert und die Vorschubgeschwindigkeit v verringert wird. Wenn der laufende Wert des relativen Widerstandes unterhalb des Vorgabewertes liegt, wird die Vorschubgeschwindigkeit v erhöht.

Die Einstellung des minimalen vorgegebenen Zwischenelektrodenraumes S_{\min} (Fig. 2) mit anschließender Messung und Speicherung des relativen Widerstandes des Zwischenelektrodenraumes S im Augenblick der intensivsten Entwicklung der Kavitation erfolgt periodisch mit einem Abstand bis zu einigen zehn Minuten. Dies ist darauf zurückzuführen, daß sich sowohl die zu bearbeitende Fläche als auch die Tempera-

tur und die elektrische Leitfähigkeit des Elektrolyten im Bearbeitungsvorgang verhältnismäßig langsam ändern.

Fig. 3 (b) zeigt, wie in dem Maße der Änderung des minimalen Zwischenelektrodenraumes S_{\min} (Fig. 2) das lokale Extremum des relativen Widerstandes des Zwischenelektrodenraumes S (Fig. 1) beim Auseinanderziehen der Elektroden (Stellung A_1 bis A_4) (Fig. 3b) anwächst.

Da sich die Formverzerrung der Kurve des relativen Widerstandes infolge der Kavitationserscheinungen beim Auseinanderziehen der Elektroden in der Entstehung eines lokalen Extremums bemerkbar macht, dessen Wert unterhalb des Wertes des relativen Widerstandes bei einem ausreichend großen Zwischenelektrodenraum liegt, ist der Vorgang des Vergleiches des Wertes des momentanen relativen Widerstandes mit dem Vorgabewert erschwert, denn der Vergleich muß nur zum Zeitmoment der intensivsten Entwicklung der Kavitation angestellt werden.

Deshalb empfiehlt es sich, den Prozeß zu steuern, indem der Wert der zweiten Ableitung nach dem relativen Widerstand des Zwischenelektrodenraumes S (Fig. 1) geändert wird.

Der Wert der zweiten Ableitung der Funktion ist proportional zur Krümmung der Funktion in diesem Punkt.

Da sich die Intensität der Kavitation im Wert eines lokalen Extremums auf der Kurve des relativen Widerstandes im Zwischenelektrodenraum S bemerkbar macht, wobei die Krümmung

des Scheitels des lokalen Extremums mit der Steigerung der Kavitationsintensität zunimmt, ist deshalb es ein leichtes, mit der Methode eines Amplitudenvergleiches den Unterschied des laufenden Wertes eines Parameters vom vorgegebenen zu verdeutlichen, denn bei einer doppelten Differentiation wird die Änderung des Kavitationsgrades in Form einer Änderung des globalen Extremums auf der Kurve nach Fig. 3 (c) abgebildet. Auf dieser einen Wert der zweiten Ableitung nach dem relativen Widerstand des Zwischenelektrodenraumes darstellenden Kurve ist es ersichtlich, wie die Amplitude der globale Extrema darstellenden Impulse A'_1 bis A'_4 in dem Maße der Änderung des minimalen Zwischenelektrodenraumes S_{\min} (Fig. 2) anwächst.

Im Falle der Ausnutzung der im fallenden Ast der Stromspannungskennlinie arbeitenden Speisequelle 1 (Fig. 1) wird zur Prozeßsteuerung der elektrochemischen Bearbeitung der Wert der durch eine Kavitation im Elektrolyten beim Auseinanderziehen der Elektroden hervorgerufenen Änderung der relativen Elektrodenspannung gemessen.

Unter der relativen Spannung wird das Verhältnis des laufenden Wertes der Elektrodenspannung zu ihrem Wert bei einem minimalen Zwischenelektrodenraum S_{\min} (Fig. 2) verstanden. Die Steuerung nach relativen Parametern eliminiert einen durch eine eventuelle Änderung der Spannung der Speisequelle 1 (Fig. 1), der Temperatur des Elektrolyten, der zu bearbeitenden Fläche usw. herbeigeführten Fehler.

Es ist bekannt, daß bei der Speisung der Belastung von einer Stromquelle die Spannung an dieser Belastung proportional zu ihrem Widerstand ist. Dies bedeutet, daß die Impulsform der Elektrodenspannung U in Abhängigkeit von der Intensität der Kavitation verzerrt wird.

Fig. 3 (f) zeigt, wie im Maße der Verringerung des minimalen Zwischenelektrodenraumes S_{\min} (Fig. 2) der Wert des lokalen Extremums C_I bis C_4 auf der Kurve der Änderung der relativen Elektrodenspannung anwächst.

Zur exakteren Fixierung des Änderungswertes des lokalen Extremums auf der Kurve der die Intensität der Kavitation bestimmenden Änderung der relativen Spannung und folglich auch zur exakteren Steuerung des Bearbeitungsvorganges wird als Informationsparameter der Wert der zweiten Ableitung der relativen Elektrodenspannung herangezogen.

Fig. 3 (e) zeigt, wie mit einer Verringerung des Wertes des minimalen Zwischenelektrodenraumes S_{\min} (Fig. 2) die Amplitude C'_1 bis C'_4 des globalen Extremums auf der Kurve der zweiten Ableitung nach der relativen Spannung zunimmt. Die Anordnung zur elektrochemischen Bearbeitung enthält einen an das Werkzeug 2 und an das Werkstück 3 angeschlossenen Kavitationsgeber 7 (Fig. 4). Der Ausgang des Kavitationsgebers 7 ist elektrisch mit einem Eingang 8 einer Steuereinrichtung 9 für die Bearbeitungsintensität verbunden. Das Werkzeug 2 und das Werkstück 3 sind an die Ausgangs-

schienen einer Impulsspeisequelle 1 angeschlossen.

Die Steuereinrichtung 9 für die Bearbeitungsintensität enthält eine Auswahl- und Speichereinheit 10 für den Wert eines Kavitationsparameters beim minimalen Zwischenelektrodenraum S_{\min} (Fig. 2), die mit ihrem Ausgang an einen Eingang 11 (Fig. 4) einer Recheneinheit 12 für den relativen Wert der Funktion eines Kavitationsparameters angeschlossen ist, deren Eingang 13 mit einem Eingang 14 der Auswahl- und Speichereinheit 10 und mit dem Ausgang des Kavitationsgebers 7 elektrisch gekoppelt sind. Der Ausgang der Recheneinheit 12 für den relativen Wert der Funktion ist an einen Eingang 15 einer Auswahl- und Speichereinheit 16 für den relativen Wert der Funktion eines Kavitationsparameters und an einen Eingang 17 einer Vergleichseinheit 18 für den laufenden relativen Wert der Funktion eines Kavitationsparameters und für einen Vorgabewert angeschlossen. Ein Eingang 19 der Vergleichseinheit 18 ist mit dem Ausgang der Auswahl- und Speichereinheit 16 verbunden. Der Ausgang der Vergleichseinheit 18 ist an einen Eingang 20 einer Sperrschaltung 21 angeschlossen, deren Ausgang als Ausgang der Steuereinrichtung 9 für die Bearbeitungsintensität fungiert und an einen Stellmechanismus 22 angekoppelt ist.

Die Steuereingänge 23, 24 und 25, 26 der Auswahl- und Speichereinheit 10 bzw. 16 und der Steuereingang 27 der Sperrschaltung 21 sind an eine Einheit 28 zur zeitlichen

Steuerung angeschlossen.

Die Auswahl- und Speichereinheit 10 (Fig. 5) für einen Kavitationsparameter beim minimalen Zwischenelektrodenraum S_{\min} (Fig. 2) ist aus einem Speicherkondensator 29 (Fig. 5) aufgebaut, dessen einer Belag geerdet und dessen anderer über einen Metalloxid-Feldeffekttransistor (MOSFET) 30 mit dem Eingang 14 der Auswahl- und Speichereinheit 10 und mit dem Eingang 11 der Recheneinheit 12 verbunden ist. Der Entladekreis des Speicherkondensators 29 besteht aus einem mit einem Anschluß an den nichtgeerdeten Belag des Kondensators 29 gelegten Widerstand 31. Der andere Anschluß des Widerstandes 31 ist über einen Metalloxid-Feldeffekttransistor 32 an Erde gelegt. Die Steuereingänge der Transistoren 30 und 32 sind an die Steuereingänge 23 und 24 der Auswahl- und Speichereinheit 10 angeschlossen.

Die Recheneinheit 12 für den relativen Wert der Funktion eines Kavitationsparameters stellt eine Divisionseinrichtung dar, die einen Operationsverstärker 33 enthält, dessen invertierender Eingang mit seinem Ausgang über einen Kondensator 34 gekoppelt ist. Über einen summierenden Widerstand 35 ist der invertierende Eingang des Operationsverstärkers 33 mit einem Funktionalwandler 36 und über einen summierenden Widerstand 37 mit dem Ausgang eines Operationsverstärkers 38 gekoppelt. Der Ausgang des Operationsverstärkers 38 ist an den Eingang 17 der Vergleichseinheit 18 und

an den Eingang 15 der Auswahl- und Speichereinheit 16 geschaltet. Der invertierende Eingang des Operationsverstärkers 38 ist an den Eingang 13 der Recheneinheit 12 und über einen Widerstand 39 an den eigenen Ausgang angeschlossen. Der eine Multiplikation zweier Variabler ausführende Funktionalwandler 36 ist mit dessen einem Eingang an den Ausgang des Operationsverstärkers 33 und mit dem anderen Eingang an den Eingang 11 der Recheneinheit 12 gekoppelt. Die nicht invertierenden Eingänge der Operationsverstärker 33 und 38 sind an Erde gelegt.

Die Auswahl- und Speichereinheit 16 für den relativen Wert der Funktion eines Kavitationsparameters ist aus einem Speicherkondensator 40 aufgebaut, dessen einer Belag geerdet und dessen anderer über einen Metalloxyd-Feldeffekttransistor (MOSFET) 41 mit dem Eingang 15 der Auswahl- und Speichereinheit 16 und mit dem Eingang 19 der Vergleichseinheit 18 verbunden ist. Der Entladekreis des Speicherkondensators 40 besteht aus einem mit dessen einem Anschluß an den nicht-geerdeten Belag des Kondensators 40 angeschlossenen Widerstand 42. Der andere Anschluß des Widerstandes 42 ist über einen Metalloxyd-Feldeffekttransistor 43 an Erde gelegt. Die Steuereingänge der Transistoren 41 und 43 sind an die Steuereingänge 25 bzw. 26 der Auswahl- und Speichereinheit 16 angeschlossen.

Die Vergleichseinheit 18 für den laufenden relativen Wert der Funktion eines Kavitationsparameters und für einen

Vorgabewert ist aus einem Differentialoperationsverstärker 44 aufgebaut, dessen Ausgang als Ausgang der Vergleichseinheit 18 wirkt und an den Eingang 20 der Sperrschaltung 21 angeschlossen ist. Der invertierende Eingang des Operationsverstärkers 44 ist an den Ausgang eines Operationsverstärkers 45 angeschlossen, dessen invertierender Eingang an den Eingang 17 der Vergleichseinheit 18 und über einen Widerstand 46 an seinen Ausgang geschaltet ist. Der nicht invertierende Eingang des Verstärkers 44 ist an den Ausgang eines Operationsverstärkers 47 angeschlossen, dessen invertierender Eingang an den Eingang 19 der Vergleichseinheit 18 und über einen Widerstand 48 an seinen Ausgang gekoppelt ist. Die nicht invertierenden Eingänge der Operationsverstärker 45 und 47 sind an Erde gelegt.

Die Sperrschaltung 21 enthält ein UND-Gatter 49, dessen einer Eingang an den Eingang 20 der Sperrschaltung 21 und dessen anderer Eingang über einen Inverter 50 an den Steuereingang 27 der Schaltung 21 angeschlossen sind. Der Ausgang des UND-Gatters 49 wirkt als Ausgang der Steuereinrichtung 9 für die Bearbeitungsintensität und ist an den Stellmechanismus 22 angeschlossen.

Die Differenziereinheit 51 (Fig. 6) zweiter Ordnung enthält eine Reihenschaltung aus zwei über die invertierenden Eingänge mit Hilfe von Widerständen 54 und 55 gegengekoppelten Operationsverstärkern 52 und 53. Der Ausgang des Opera-

tionsverstärkers 53 stellt den Ausgang der Differenzier-einheit 51 dar und ist an den Eingang 13 der Rechenein-heit 12 angeschlossen, während sein invertierender Eingang über einen Differenzierkondensator 56 an den Ausgang des Operationsverstärkers 52 geschaltet ist. Der invertierende Eingang des Verstärkers 52 ist über einen Differenzierkonden-sator 57 an den Eingang 8 der Steuereinrichtung 9 für die Bearbeitungsintensität und an den Eingang 14 der Auswahl- und Speichereinheit 10 angeschlossen. Die nicht invertieren-den Eingänge der Operationsverstärker 52 und 53 sind an Erde gelegt.

Der Kavitationsgeber 7 (Fig. 7) stellt einen Spannungs-geber dar und ist aus einem über den invertierenden Eingang mit Hilfe eines Widerstandes 59 gegengekoppelten Operations-verstärker 58 aufgebaut. Der Ausgang des Operationsverstär-kers 58 ist an den Eingang 8 der Steuereinrichtung 9 für die Bearbeitungsintensität und sein invertierender Eingang an den Mittelpunkt eines Potentiometers 60 angeschlossen. Ein Anschluß des Potentiometers 60 ist geerdet, sein anderer Anschluß ist an das auf negativem Potential liegende Werk-zeug 2 gekoppelt.

Der Kavitationsgeber 7 (Fig. 8) kann auch in folgender Schaltung ausgeführt sein. Er enthält eine Recheneinheit 61 für den Widerstand, deren Ausgang als Ausgang des Kavita-tionsgebers 7 auftritt und an den Eingang 8 der Steuerein-

909835/0561

ORIGINAL INSPECTED

richtung 9 für die Bearbeitungsintensität angeschlossen ist. Ein Eingang 62 der Recheneinheit 61 für den Widerstand ist mit dem Ausgang eines Spannungsgebers 63 verbunden, dessen Eingang mit dem auf negativem Potential liegenden Werkzeug 2 gekoppelt ist. Der Eingang 64 der Einheit 61 ist an den Ausgang eines Stromgebers 65 angeschlossen.

Der Spannungsgeber 63 ist aus einem über den nicht invertierenden Eingang mittels eines Widerstandes 67 gegengekoppelten Operationsverstärker 66 aufgebaut. Der Ausgang des Operationsverstärkers 66 ist an den Eingang 62 der Recheneinheit 61 für den Widerstand und dessen nicht invertierender Eingang an den Mittelpunkt eines Potentiometers 68 gekoppelt. Ein Anschluß des Potentiometers 68 ist geerdet und der andere an das auf negativem Potential liegende Werkzeug 2 geschaltet. Der invertierende Eingang des Operationsverstärkers 66 ist an Erde gelegt.

Der Stromgeber 65 beinhaltet einen über den nicht invertierenden Eingang mittels eines Widerstandes 70 gegengekoppelten Operationsverstärker 69. Der Ausgang des Verstärkers 69 ist an den Eingang 64 der Recheneinheit 61 für den Widerstand und sein nicht invertierender Eingang an den Mittelpunkt eines Potentiometers 71 gelegt, dessen Anschlüsse parallel zu der auf einen Widerstand 73 geschalteten Ausgangswicklung eines Transformators 72 geschaltet sind. Der invertierende Eingang des Verstärkers 69 und ein Anschluß

des Potentiometers 71 sind an Erde gelegt.

Die Differenziereinheit 61 ist aus einem über den invertierenden Eingang mit Hilfe eines Integrierkondensators 75 kapazitiv rückgekoppelten Operationsverstärker 74 aufgebaut. Der Ausgang des Verstärkers 74 fungiert als Ausgang des Kavitationsgebers 7. An den invertierenden Eingang des Verstärkers 74 ist über einen summierenden Widerstand 76 der Ausgang eines Funktionalwandlers 77 sowie ein Anschluß eines Widerstandes 78 geschaltet, dessen anderer Anschluß an den Eingang 62 der Einheit 61 gekoppelt ist. Ein Eingang des Funktionalwandlers 77 stellt den Eingang 64 der Einheit 61 dar, während dessen anderer Eingang an den Ausgang des Verstärkers 64 angeschlossen ist.

In Fig. 9 bezeichnen:

- 79 - eine zeitliche Änderungskurve des Zwischenelektrodenraum-Wertes S (Fig. 1);
- 80 - einen Pegel des vorgegebenen Änderungswertes der relativen Elektrodenspannung;
- 81 - eine Änderungskurve des Wertes der relativen Elektrodenspannung;
- 82 - eine Änderungskurve des Wertes der zweiten Ableitung der relativen Elektrodenspannung;
- 83 - einen Pegel des vorgegebenen Änderungswertes der zweiten Ableitung der relativen Elektrodenspannung.

In Fig. 10 bezeichnen:

- 84 - eine zeitliche Änderungskurve des Zwischenelektrodenraum-Wertes S (Fig. 1);
- 85 - einen Pegel des vorgegebenen Änderungswertes der relativen Elektrodenspannung;
- 86 - eine Änderungskurve des Wertes der relativen Elektrodenspannung;
- 87 - eine Änderungskurve des Wertes der zweiten Ableitung der relativen Elektrodenspannung;
- 88 - einen Pegel des vorgegebenen Änderungswertes der zweiten Ableitung der relativen Elektrodenspannung;
- 89,90 - ein Ausgangssignal der Sperrschaltung 21 (Fig. 5).

Sämtliche in Fig. 10 wiedergegebenen Kurven entsprechen dem Wert des minimalen Zwischenelektrodenraumes S'_{\min} unterhalb dieses in Fig. 9, d.h. $S'_{\min} < S'_{\min}$.

In Fig. 11 bezeichnen:

- 91 - eine zeitliche Änderungskurve des Zwischenelektrodenraum-Wertes (Fig. 2);
- 92 - eine Kurve der Spannungsänderung;
- 93 - eine Kurve der Stromänderung im Zwischenelektrodenraum S (Fig. 1);
- 94 - eine Änderungskurve des Wertes des relativen Widerstandes des Zwischenelektrodenraumes;
- 95 - einen Pegel des vorgegebenen Änderungswertes des relativen Widerstandes des Zwischenelektrodenraumes S (Fig. 1);

- 96 - eine Änderungskurve des Wertes der zweiten Ableitung eines relativen Widerstandes des Zwischenelektrodenraumes S (Fig. 1);
- 97 - einen Pegel des vorgegebenen Änderungswertes der zweiten Ableitung des relativen Widerstandes des Zwischenelektrodenraumes S (Fig. 1).

Fig. 12 zeigt:

- 98 - eine zeitliche Änderungskurve des Zwischenelektrodenraum-Wertes S (Fig. 1);
- 99 - eine Änderungskurve der Elektrodenspannung;
- 100 - eine Stromänderungskurve im Zwischenelektrodenraum S (Fig. 1);
- 101 - eine Änderungskurve des Wertes des relativen Widerstandes des Zwischenelektrodenraumes S (Fig. 1);
- 102 - einen Pegel des vorgegebenen Änderungswertes des relativen Widerstandes des Zwischenelektrodenraumes S (Fig. 1);
- 103 - eine Änderungskurve des Wertes der zweiten Ableitung des relativen Widerstandes des Zwischenelektrodenraumes S (Fig. 1);
- 104 - einen Pegel des vorgegebenen Änderungswertes der zweiten Ableitung des relativen Widerstandes;
- 105,106 - ein Ausgangssignal der Sperrschaltung 21 (Fig. 5).

Fig. 13 zeigt:

- 107 - eine zeitliche Änderungskurve des Zwischenelektrodenraumes S (Fig. 1);

- 108 - eine Änderungskurve der Elektrodenspannung, wo U_{\min} ein Spannungswert beim minimalen Zwischenelektrodenraum S_{\min} (Fig. 2) ist;
 - 109 - ein auf den Steuereingang 24 (Fig. 5) der Auswahl- und Speichereinheit 10 gegebenes Steuersignal;
 - 110 - ein auf den Steuereingang 23 (Fig. 5) der Auswahl- und Speichereinheit 10 gegebenes Steuersignal;
 - 111 - eine Spannung am Speicherkondensator 29 (Fig. 5) der Auswahl- und Speichereinheit 10;
 - 112 - ein Steuersignal am Eingang 27 (Fig. 5) der Sperrschaltung 21.
- Fig. 14 zeigt:
- 113 - eine zeitliche Änderungskurve des Zwischenelektrodenraum-Wertes S (Fig. 1);
 - 114 - eine Änderungskurve des Wertes der relativen Elektrodenspannung, wo U_{\max} - ein Maximalwert der relativen Spannung ist;
 - 115 - ein auf den Steuereingang 26 (Fig. 5) der Auswahl- und Speichereinheit 16 gegebenes Steuersignal;
 - 116 - ein auf den Steuereingang 25 (Fig. 5) der Auswahl- und Speichereinheit 16 gegebenes Steuersignal;
 - 117 - eine Spannung am Speicherkondensator 40 (Fig. 5) der Auswahl- und Speichereinheit 16;
 - 118 - ein Steuersignal am Eingang 27 der Sperrschaltung 21.

Vor Beginn der Bearbeitung werden die Werkzeugelektroden 2 (Fig. 1) und das Werkstück 3, die gegeneinander

schwingen - bis zur gegenseitigen Berührung bei Fehlen einer Spannung angenähert und um einen Vorgabewert des minimalen Zwischenelektrodenraumes S_{\min} (Fig. 2) auseinandergezogen. Dann wird auf die Elektroden ein Spannungsimpuls U (Fig. 1) gegeben, wobei der Druck des Elektrolyten am Eingang des Zwischenelektrodenraumes S gleich P_1 ist. Es beginnt die elektrochemische Bearbeitung.

Da der Intensitätsgrad der Kavitation des Elektrolyten bei einem schwingenden Abhub des Werkzeuges 2 und einem vorgegebenen Druck P_1 des Elektrolyten eindeutig vom konkreten Wert des minimalen Zwischenelektrodenraumes S_{\min} (Fig. 2) abhängt, wird am Anfang der Bearbeitung mit Hilfe des Kavitationsgebers 7 (Fig. 4) der Wert eines gewissen Parameters gemessen, der eindeutig den dem eingestellten minimalen Zwischenelektrodenraum S_{\min} (Fig. 2) entsprechenden Intensitätsgrad der Kavitation bestimmt.

Um den Einfluß einer eventuellen Änderung der Ausgangsspannung der Speisequelle 1 (Fig. 4), der Temperatur des Elektrolyten, der Fläche des Werkstücks 3 auszuschließen, wird das durch den Kavitationsgeber 7 erzeugte Signal auf den Eingang 13 der Einheit 12 geliefert, wo ein relativer Wert der Funktion eines Kavitationsparameters durch Division des laufenden Wertes des Kavitationsparameters durch den Wert des gleichen, bei einem minimalen Zwischenelektro-

denraum S_{\min} (Fig. 2) gemessenen Parameters errechnet wird.

Die Messung des Wertes des Kavitationsparameters beim minimalen Zwischenelektrodenraum S_{\min} erfolgt mit Hilfe der Auswahl- und Speichereinheit 10 (Fig. 4). Diese Einheit 10 ist mit ihrem Eingang 14 an den Ausgang des Kavitationsgebers 7 angeschlossen und stellt eine analoge Speichereinrichtung dar, die über eine vorgegebene Zeit den laufenden Wert des Kavitationsparameters beim minimalen Zwischenelektrodenraum S_{\min} (Fig. 2) speichert. Das Ausgangssignal der Auswahl- und Speichereinheit 10 (Fig. 4) wird auf den Eingang 11 der Recheneinheit 12 geliefert, an deren Ausgang ein dem relativen Wert der Funktion eines Kavitationsparameters proportionales Signal erzeugt wird. Da der Wert dieses Signals mit dem Wert des vor Beginn der Bearbeitung eingestellten minimalen Zwischenelektrodenraumes S_{\min} (Fig. 2) eindeutig verbunden ist, wird dieses Signal in die Auswahl- und Speichereinheit 16 (Fig. 4) eingespeichert und über eine bestimmte Bearbeitungsperiode als Vorgabewert benutzt. Die Auswahl- und Speichereinheit 16 stellt eine analoge Speichereinrichtung dar.

Am Anfang der elektrochemischen Bearbeitung erfolgen also eine Berechnung und eine Speicherung des vorgegebenen relativen Wertes der Funktion eines dem vorgegebenen minimalen Zwischenelektrodenraum S_{\min} (Fig. 2) entsprechenden Kavitationsparameters.

Hierbei wird auf den Eingang 27 (Fig. 4) der Sperrschaltung 21 von der Einheit 28 zur zeitlichen Steuerung ein Signal gegeben, das den Durchgang der Signale zum Stellmechanismus 22 zwecks Vermeidung einer Freigabe von Fehlersignalen sperrt, die bei der Kommutierung der Auswahl- und Speichereinheiten 10, 16 während des Speicherzyklus entstehen können. Dann wird das Sperrsignal nach Beendigung des Zyklus aufgehoben.

Nach Abschluss des Anfangsstadiums der Bearbeitung, wo in den Einheiten 10, 16 die Werte der die vorgegebene Bearbeitungsintensität bestimmenden vorgegebenen Signal gespeichert werden, vergleicht die Vergleichseinheit 18, deren Eingang 17 an den Ausgang der Recheneinheit 12 und deren Eingang 19 an den Ausgang der Auswahl- und Speichereinheit 16 angeschlossen sind, ein dem laufenden relativen Wert der Funktion eines Kavitationsparameters mit einem dem Vorgabewert entsprechenden Signal.

Liegt hierbei der relative Zeitwert der Funktion eines Kavitationsparameters unterhalb des Vorgabewertes, erzeugt die Vergleichseinheit 18 ein Signal, nach dem der Stellmechanismus 22 die Vorschubgeschwindigkeit v (Fig. 1) des Werkzeuges 2 erhöht. Liegen umgekehrte Verhältnisse vor, erzeugt die Einheit 18 (Fig. 4) ein Signal, nach dem der Stellmechanismus 22 die Vorschubgeschwindigkeit v (Fig. 1) verringert und den Druck P_1 am Eingang des Zwischenelektrodenraumes S erhöht.

Die Einstellung des vorgegebenen minimalen Zwischenelektrodenraumes S (Fig. 2) mit anschließender Messung und Speicherung des relativen Wertes der Funktion eines den Zwischenelektrodenraum S (Fig. 1) eindeutig bestimmenden Kavitationsparameters geschieht periodisch in einem Abstand von 5 bis 10 Minuten und mehr, weil die Vertiefungsgeschwindigkeit des Werkzeuges 2 in das Werkstück 3 verhältnismäßig gering ist.

Die Messung und die Speicherung des Wertes eines Kavitationsparameters beim minimalen Zwischenelektrodenraum S (Fig. 1) erfolgen einmal für 5 bis 10 Elektroden-schwingungen.

Das Zeitdiagramm der Steuerung der Einrichtung 9 (Fig. 4) wird mit Hilfe der Einheit 28 zur zeitlichen Steuerung durch Einwirkung mittels der Steuersignale 109, 110, 112 (Fig. 13) und 115, 116, 118 (Fig. 14) auf die Auswahl- und Speichereinheiten 10 und 16 (Fig. 4) und auf die Sperrschaltung 21 realisiert.

Gehen wir ausführlicher auf die Arbeitsweise der Einheiten und Schaltungen der Steuereinrichtung 9 (Fig. 5) für die Bearbeitungsintensität ein.

Das dem Wert eines Kavitationsparameters entsprechende Ausgangssignal des Kavitationsgebers 7 wird auf den Eingang der Auswahl- und Speichereinheit 10 gegeben, in der bei einer kurzzeitigen Öffnung des Transistors 30 im Augenblick des minimalen Zwischenelektrodenraumes

S_{\min} (Fig. 2) der Speicherkondensator 29 (Fig. 5) aufgeladen wird, der auch im Laufe mehrerer Schwingungsperioden des Werkzeuges 2 eine dem Wert eines Kavitationsparameters beim minimalen Zwischenelektrodenraum S_{\min} (Fig. 2) entsprechende Spannung speichert.

Die Entladung des Kondensators 29 erfolgt über den Widerstand 31 bei einer kurzzeitigen Durchschaltung des Transistors 32.

Der Vorgang der Auswahl und der Speicherung des Wertes eines Kavitationsparameters ist in Fig. 13 mit Hilfe der Kurven 107, 108, 109, 110, 111, 112 für den Fall dargestellt, daß als Kavitationsparameter eine Elektrodenspannung benutzt wird.

Die Ausgangssignale des Kavitationsgebers 7 (Fig. 5) und der Auswahl- und Speichereinheit 10 gelangen auf die Eingänge 13 und 11 der Recheneinheit 12 für den relativen Wert der Funktion eines Kavitationsparameters, die eine Divisionseinrichtung darstellt, die eine Funktion $Z = X/Y$ mit einer Auflösungsmethode für eine Differentialgleichung

$$Z' = -k[ZY - X] \quad Z(0) = 0$$

realisiert. Die Variable X entspricht einem auf den Eingang 13 der Einheit 12 und die Variable Y einem auf den Eingang 11 der Einheit 12 gelieferten Signal, die Variable Z entspricht dem Ausgangssignal der Einheit 12.

Die Funktion einer Integrier- und Summierungseinrichtung übernimmt der mit den summierenden Widerständen 35, 37

kapazitiv rückgekoppelte Operationsverstärker 33.

Der Verstärker 38 erfüllt die Funktion einer Umkehr der Variablen X. Der Funktionalwandler 36 erfüllt die Funktion einer Multiplikation der Variablen Y,Z und kann in einer beliebigen Standardschaltung analoger Rechen-technik, beispielsweise auf der Basis von logarithmischen Verstärkern u.ä., ausgeführt sein. Auf dieser Basis kann die gesamte Recheneinheit ausgeführt sein.

Das dem relativen Wert der Funktion eines Kavitationsparameters entsprechende Signal wird vom Ausgang der Einheit 12 der Auswahl- und Speichereinheit 16 für den vorgegebenen relativen Wert der Funktion eines Kavitationsparameters zugeführt, die in Analogie zur vorstehend beschriebenen Einheit 10 funktioniert. Ihre Arbeitsweise ist in Fig. 14 mit Hilfe der Kurven 113, 114, 115, 116, 117, 118 für den Fall dargestellt, daß als Kavitationsparameter eine Elektrodenspannung in Frage kommt.

Im Unterschied zur Arbeit der Einheit 10 (Fig. 5) erfolgt die Aufladung des Speicherkondensators 40 zu dem Zeitpunkt, zu dem die Änderung des Widerstandes R (Fig. 2) des Zwischenelektrodenraumes S infolge einer Kavitation einen Maximalwert erreicht.

Der relative Zeitwert des Kavitationsparameters wird mit dem Vorgabewert mit Hilfe der Vergleichseinheit 18 (Fig. 5) verglichen, die auf der Basis des Differential-

operationsverstärkers 44 aufgebaut ist, dessen Eingängen Signale von den Ausgängen der Einheiten 12, 16 über die Umkehrverstärker 45, 47 zugeleitet werden.

Bei der Erzeugung eines Vergleichssignals in Form eines positiven Potentials am Ausgang der Einheit 18 kommt das letztere über das UND-Gatter 49 an den Stellmechanismus 22. Dieses Signal gelangt auf den Stellmechanismus 22 nur im Falle des Fehlens eines Sperrsignals, das durch die Einheit 28 zur zeitlichen Steuerung formiert wird und am Eingang 27 der Sperrschaltung 21, also am Inverter 50, eintrifft.

Da die Entwicklung der Kavitation bei einem schwingenden Abhub des Werkzeuges 2 von einer sprunghaften Zunahme des Widerstandes R (Fig. 2) des Zwischenelektrodenraumes S (Fig. 1) begleitet wird, tritt als einer der die Kavitationsintensität bewertenden Parameter gemäß dem Verfahren der durch die Kavitation hervorgerufene Änderungswert des Widerstandes des Zwischenelektrodenraumes S auf.

Der Kavitationsgeber 7 (Fig. 8) realisiert das Prinzip der Widerstandsmessung des Zwischenelektrodenraumes S (Fig. 1) mit der Methode "Amperemeter-Voltmeter" und besteht aus dem Spannungsgeber 63 (Fig. 3) und dem Stromgeber 65, deren Ausgangssignale den Eingängen 62, 64 der eine Divisionseinrichtung darstellenden Recheneinheit 61 für den Widerstand zugeführt werden.

Der Spannungsgeber 63 ist auf der Basis des Potentiometers 68 aufgebaut, dessen Spannung vom Mittelpunkt über den nicht invertierenden Entkopplungsverstärker 66 auf den Eingang 62 der Einheit 61 eingespeist wird.

Der Stromgeber 65 stellt den Stromtransformator 72 dar, dessen Ausgangsspannung über das Potentiometer 71 und den nicht invertierenden Entkopplungsverstärker 69 auf den Eingang 64 der Einheit 61 gegeben wird.

Die Recheneinheit 61 für den Widerstand ist nach der Ausführung und Arbeitsweise analog zur oben beschriebenen Einheit 12 (Fig. 4). An ihrem Ausgang wird ein dem laufenden Widerstandswert des Zwischenelektrodenraumes S (Fig. 1) proportionales Signal erzeugt.

In Fig. 11 zeigen die Kurven 91, 92, 93, 94, 95 die Änderungsgesetze von Spannung, Strom, relativem Widerstand des Zwischenelektrodenraumes S (Fig. 1) im Falle solch eines großen minimalen Zwischenelektrodenraumes S'_{\min} (Fig. 11), daß sich keine Kavitation entwickelt. Bei einer Verringerung des minimalen Zwischenelektrodenraumes S''_{\min} (Fig. 12) und bei der Entwicklung der Kavitation (Kurven 98, 99, 100, 101, 102, 105) beim Abhub des Werkzeuges 2 (Fig. 1) tritt eine durch eine Änderung des relativen Widerstandes infolge der Kavitation veranlaßte Abweichung der Form der Kurve 101 (Fig. 12) von der ursprünglichen Kurve 94 (Fig. 9) in Erscheinung, die durch einen Vergleich des laufenden Wertes des relativen Widerstandes des Zwischenelektrodenraumes S

(Fig. 1) zum Zeitpunkt einer maximalen Entwicklung der Kavitation in der Einheit 18 (Fig. 5) mit einem durch die Einheit 16 gespeicherten Vorgabewert (Kurve 102, Fig. 12) fixiert wird, der am Anfang der Bearbeitung nach dem letzten Zyklus der Einstellung des Zwischenelektrodenraumes S (Fig. 1) erhalten wird.

Die Form der Kurven 99, 100 (Fig. 12) ist für den Fall der Benutzung einer Speisequelle 1 (Fig. 1) mit einer starren Stromspannungskennlinie gegeben.

Falls die Speisequelle 1 bei Betrieb im fallenden Ast der Stromspannungskennlinie betrieben wird, kann man als Kavitationsgeber 7 (Fig. 7) einen Spannungsgeber einsetzen, der auf der Basis des Potentiometers 60 ausgeführt ist, dessen Spannung vom Mittelpunkt über den Umkehrverstärker 58 auf den Eingang 8 der Steuereinrichtung 9 für die Betriebsintensität geliefert wird. Es ist bekannt, daß bei der Speisung der Belastung von einer Stromquelle die Spannung darüber proportional zu ihrem Widerstand ist. Dies bedeutet, daß die Impulsform der Spannung U (Fig. 1) an den Elektroden - dem Werkzeug 2 und dem Werkstück 3 - in Abhängigkeit von der Kavitationsintensität verzerrt werden wird.

Werden die Formen der Kurven 81 (Fig. 9) und 86 (Fig. 10) bei verschiedenen minimalen Zwischenelektrodenräumen S_{\min} (Kurven 79, Fig. 9, und 84, Fig. 10) verglichen, so wird eine Spitze der relativen Spannung auf der Kurve 86 (Fig. 10) beobachtet, die auf die Entwicklung einer Kavita-

tion beim Abhub des Werkzeuges 2 (Fig. 1) zurückzuführen ist. Bei einem Vergleich mit dem vorgegebenen Pegel 85 (Fig. 10) wird ein Signal 89 am Ausgang der Schaltung 21 (Fig. 5) zur Steuerung des Stellmechanismus 22 erzeugt.

Die Formverzerrung der Kurven der relativen Elektroden-
spannung und des relativen Widerstandes des Zwischenelek-
trodenraumes S (Fig. 1) wegen der Entwicklung der Kavitati-
on macht sich in Form eines lokalen Extremums im rechten
Teil der Kurven bemerkbar, dessen Auftreten dem
Augenblick des Abhubes des Werkzeuges 2 (Kurven 86, Fig. 10,
und 101, Fig. 12) entspricht. Die Fixierung der lokalen
Extrema im Amplitudenverfahren ist erschwert, weil sie
einer Auslösung der Vergleichseinrichtung gerade zum Zeit-
moment einer maximalen Kavitationsintensität bedarf.

Zur Erhöhung der Meßgenauigkeit für die Kavitationsin-
tensität durch Messung eines relativen Wertes der lokalen
Extrema der Kurven der Spannung und des Widerstandes des
Zwischenelektrodenraumes S (Fig. 1) wird in die Einrich-
tung 9 (Fig. 6) zwischen ihren Eingang 8 und den Eingang 13
der Einheit 12 die Differenziereinheit 51 zweiter Ordnung
geschaltet, auf die ein in Form einer Spannung oder eines
Widerstandes des Zwischenelektrodenraumes S (Fig. 1) dar-
gestelltes Signal vom Ausgang des Kavitationsgebers 7 ge-
geben wird, das durch die hintereinandergeschalteten Dif-
ferenzierverstärker 52, 53 differenziert und dem Eingang

der Einheit 12 zur anschließenden Berechnung des relativen Signalwertes zugeführt wird.

Der Wert der zweiten Ableitung der Funktion ist proportional der Krümmung der Funktion in diesem Punkt, weshalb, da sich die Kavitationsintensität in Form eines lokalen Extremums auf der Kurve einer relativen Spannung oder eines relativen Widerstandes geltend macht, wobei der Krümmungsgrad des Scheitels des lokalen Extremums mit einer Steigerung der Kavitationsintensität anwächst, es ein leichtes ist, durch einen Amplitudenvergleich des laufenden Wertes der zweiten Ableitung nach der relativen Spannung oder dem relativen Widerstand mit einem Vorgabewert in der Einheit 18 ein Signal zur anschließenden Steuerung des Stellmechanismus 22 zu erzeugen.

In Fig. 9 und 10 ist eine Formänderung der zweiten Ableitung nach der relativen Spannung in Abhängigkeit vom Wert des minimalen Zwischenelektrodenraumes S'_{\min} und S''_{\min} (Kurven 82, 83, 87, 88, 90) widergegeben.

In Fig. 11 (Kurven 88, 89) und in Fig. 12 (Kurven 87, 95, 96) ist eine Formänderung der zweiten Ableitung nach dem relativen Widerstand in Abhängigkeit vom Wert des minimalen Zwischenelektrodenraumes S'_{\min} und S''_{\min} (Kurven 96, 97, 103, 104, 105) gezeigt.

Die Formverzerrung der Kurve der zweiten Ableitung wegen der Kavitation tritt in Form der Entstehung eines

globalen Extremums beim Abhub des Werkzeuges 2 (Fig.) in Erscheinung, was es gestattet, eine Änderung der Kavitationsintensität einfach und zuverlässig zu fixieren und folglich die vorgegebene Bearbeitungsintensität mit einer höheren Genauigkeit zu halten.

Das vorliegende Verfahren zur elektrochemischen Bearbeitung und die Anordnung zu dessen Durchführung sichern einen hohen Genauigkeitsgrad der Formbildung (bis zu 0,02 mm) von Elementen der Oberfläche komplizierter Hohlräume bei der Ausführung verschiedener Kopier-Räumoperationen in schwer zu bearbeitenden elektrisch leitenden Werkstoffen, deren hohe Güte (Oberflächengüte bis zu 0,1 μ m) bei einer Bearbeitungsleistung bis 0,8 mm/min.

Die hohe Genauigkeit der Formbildung der zu bearbeitenden Oberflächen beseitigt praktisch das Problem einer Berechnung und einer Korrektur des Werkzeuges 2. Ist das Werkzeug 2 einmal hergestellt, kann man unter dessen Benutzung ein großes Los von Werkstücken herstellen, die voneinander nicht mehr als 0,02 mm abweichen.

Dies wird dadurch erreicht, daß im Bearbeitungsvorgang dem Werkzeug 2 mit Spannungsimpulsen synchronisierte schwingende Bewegungen in Vorschubrichtung verliehen werden.

Die Gesamtheit der Eigenschaften des angewendeten Elektrolyten, der optimalen Schwingungsparameter des Werkzeuges 2 und ein adaptives Steuerungssystem bei der Ver-

wirklichung des Verfahrens sichern eine zuverlässige Pro-
zeßführung mit Zwischenelektrodenräumen von 0,02 bis
0,05 mm ohne Beschädigung der Oberfläche des Werkzeuges und
des Werkstücks bei ausreichend geringen Drücken P_1 des
Elektrolyten am Eingang des Zwischenelektrodenraumes S.

-48-
Leerseite

2903873

. 55.

DEA-19058

Nummer:

29 03 873

Int. Cl.2:

C 25 F 3/00

Anmeldetag:

1. Februar 1979

Offenlegungstag:

30. August 1979

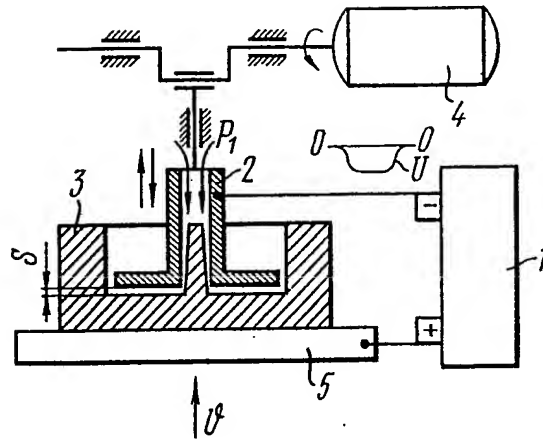


FIG. 1

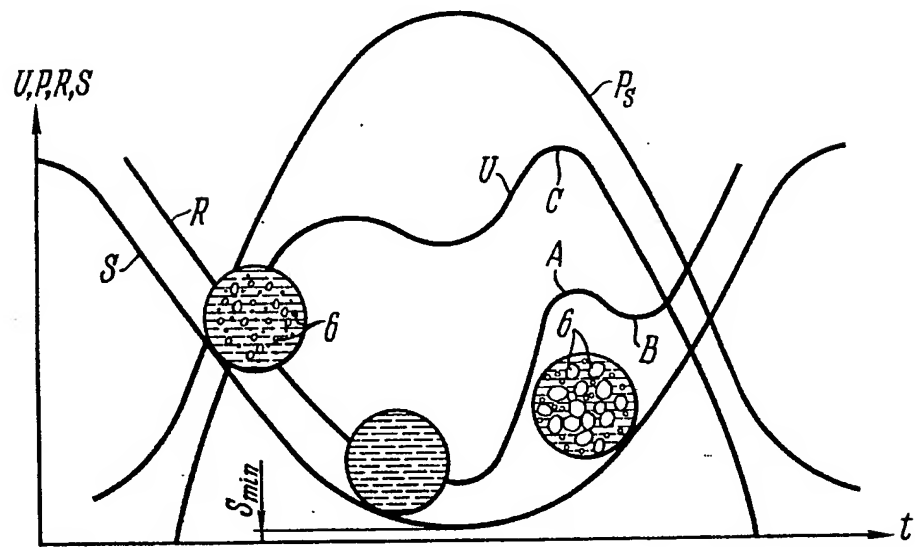
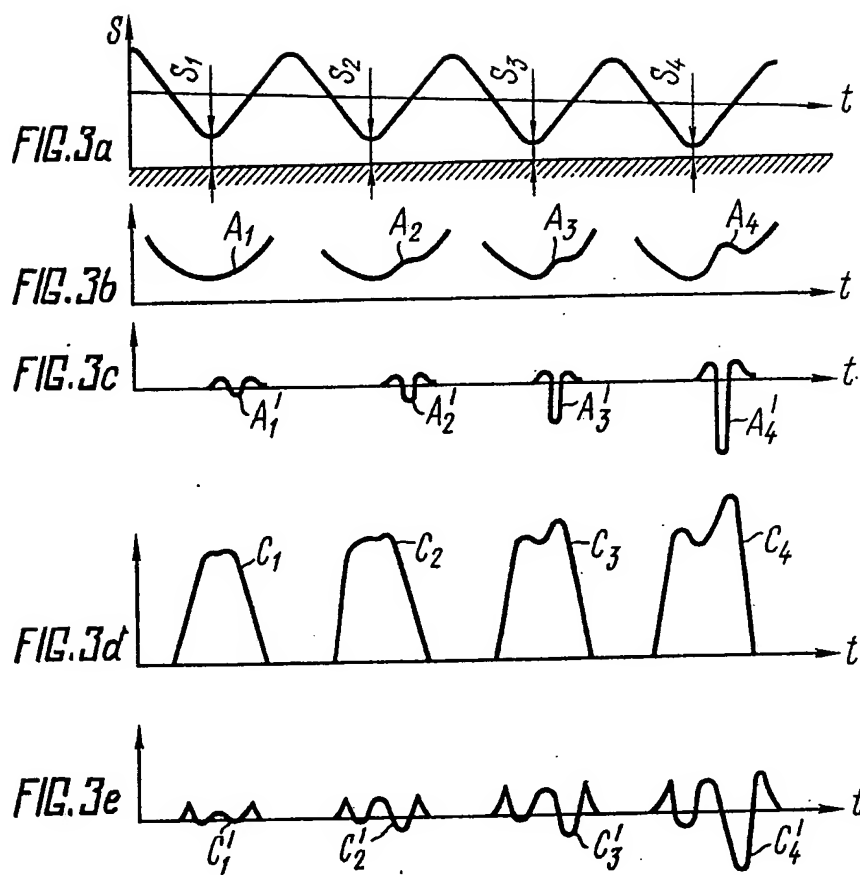


FIG. 2

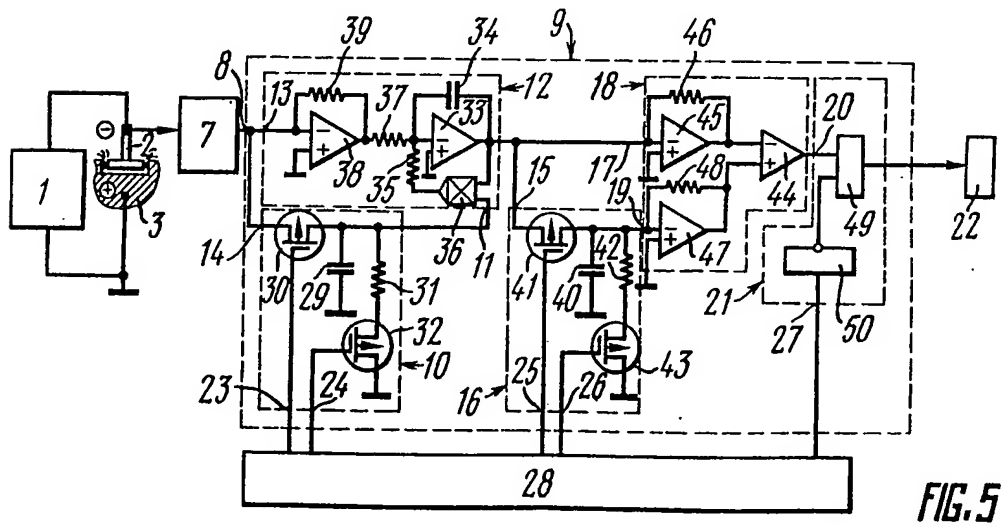
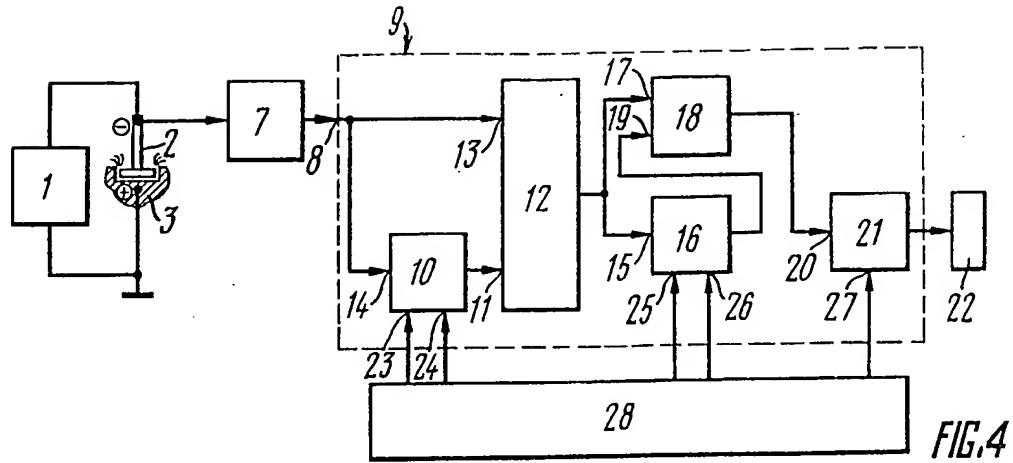
909835/0561

- 49 -



- 50 -

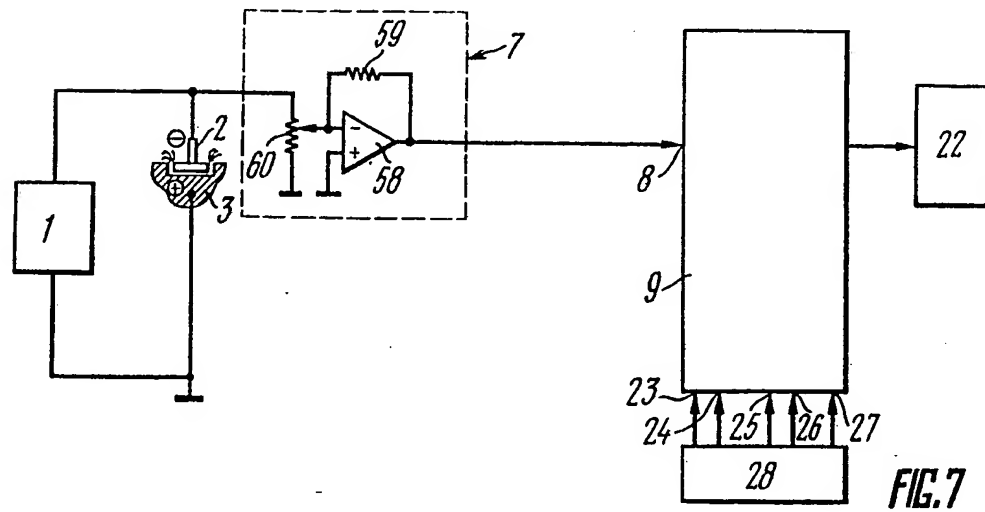
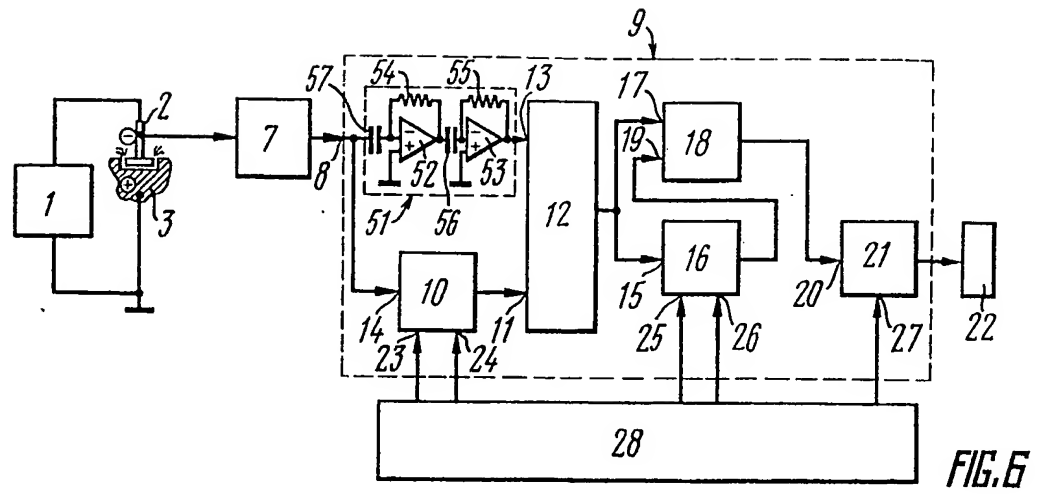
2903873

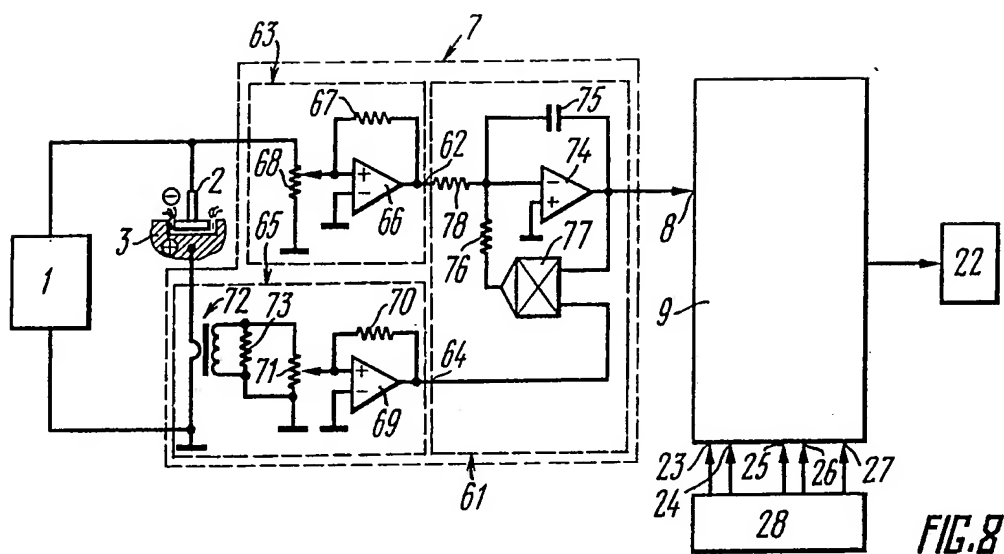


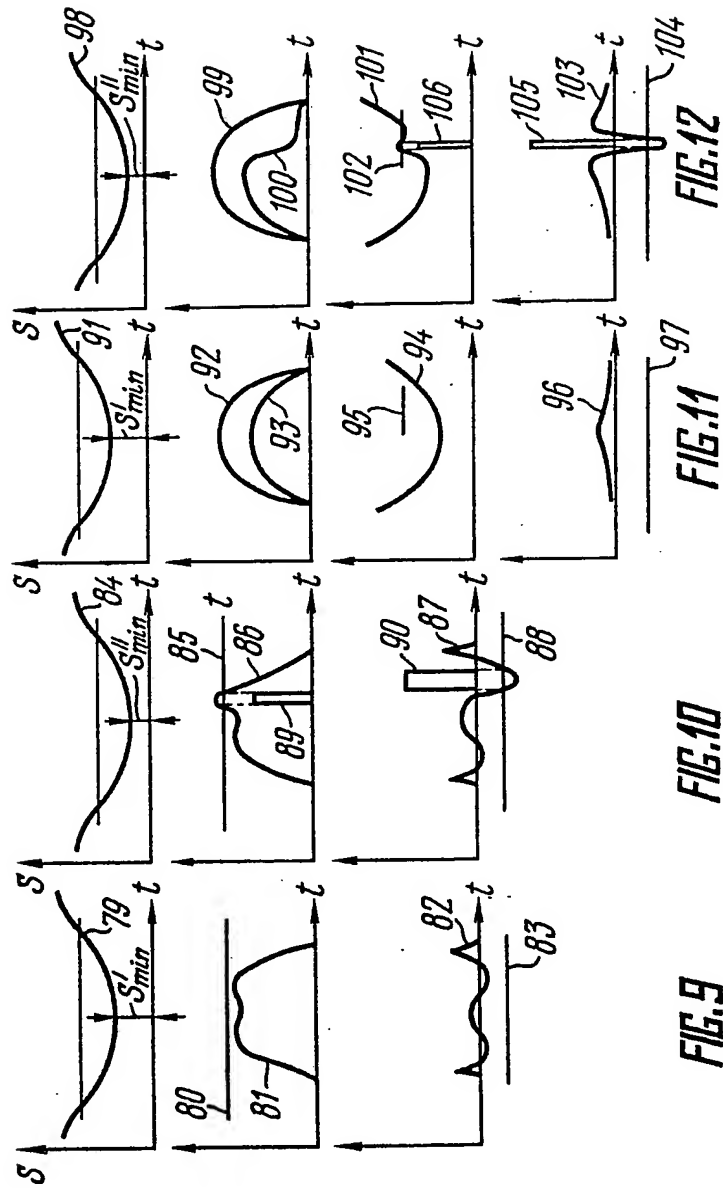
909835/0561

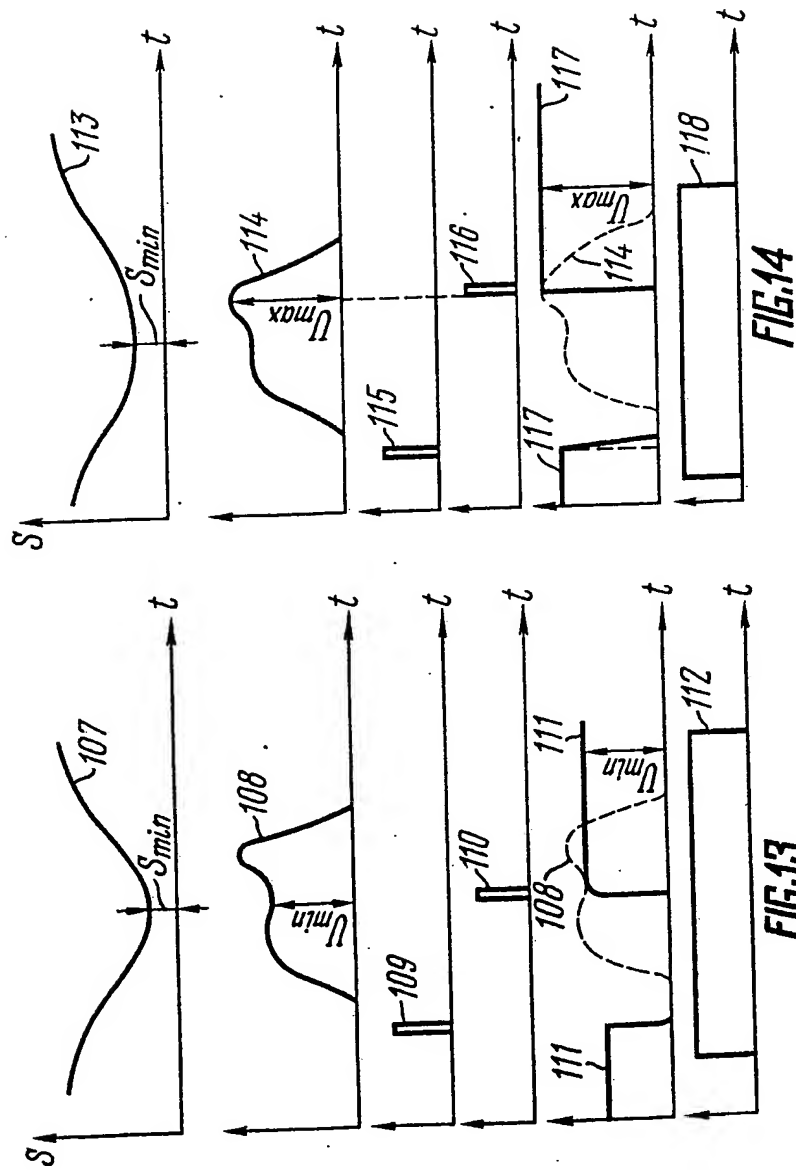
. 51 .

2903873









**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ ~~FADED~~ TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.